

EFFECTOS DE INUNDACIÓN POR LA COMBINACIÓN DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL Y MAREJADA CICLÓNICA DURANTE EL HURACÁN GEORGES EN LA COSTA ESTE DE PUERTO RICO¹

Félix L. Santiago-Collazo², Walter F. Silva Araya³, Juan González López⁴ y Javier Maldonado Maldonado⁵

RESUMEN: Puerto Rico (PR) se encuentra una zona susceptible al impacto de huracanes. El propósito de este estudio fue determinar los efectos de inundación provocados por la combinación de la marejada ciclónica y la escorrentía superficial debido al paso del huracán Georges sobre la costa Este de PR. El sistema fue modelado utilizando una combinación de herramientas que incluyen: un modelo hidrológico bidimensional y simulaciones de marejada ciclónica con un modelo de circulación oceánico de alta resolución. Se desarrolló una técnica de acoplamiento para integrar los resultados del modelo de marejada ciclónica con el modelo hidrológico. Los resultados muestran que los efectos combinados de la penetración de la marejada ciclónica y la escorrentía superficial producida por las intensas lluvias depositadas por el huracán Georges aumentaron los niveles de inundación en la zona costera. Si no se considera estos efectos, los niveles de inundación producidos por los modelos de circulación oceánica generados por viento pueden subestimar las condiciones reales de peligro. El efecto neto depende de las condiciones de la cuenca, la distribución espacial y temporal de la lluvia y de las condiciones locales de la morfología del río cerca de la costa. Aunque las descargas máximas son usualmente utilizadas como un indicador de condiciones de peligro y las regulaciones promueven el no incrementar las descargas máximas, los volúmenes de agua juegan un papel crucial para determinar condiciones de inundación. Esto es más importante durante la marejada ciclónica debido a que el agua del océano penetra tierra adentro, aumentando a su vez los volúmenes de agua y las profundidades de inundación.

Palabras clave: escorrentía superficial, huracán Georges, inundación costera, marejada ciclónica, modelos de circulación oceánica, modelos hidrológicos.

FLOODING EFFECTS COMBINING STORM SURGE AND SURFACE RUNOFF DURING HURRICANE GEORGES ON THE EASTERN COAST OF PUERTO RICO

ABSTRACT: Puerto Rico (PR) is located in a hurricane prone zone. The purpose of this study was to determine the flooding effects caused by the combination of the storm surge and surface runoff discharge during the passage of Hurricane Georges along the East coast of PR. The system was modeled using a combination of tools including: a two-dimensional hydrologic model and simulations of storm surge using a high-resolution oceanic circulation model. A

¹ Artículo recibido el 1 de diciembre de 2016 y aceptado el 17 de junio de 2017.

² Estudiante de Maestría en Ingeniería Civil, Universidad de Puerto Rico en Mayagüez (UPRM)

³ Profesor, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, UPRM). E-mail: walter.silva2@upr.edu (contacto para correspondencia).

⁴ Investigador Asistente, Sistema de Observación Oceánica y Costera del Caribe, Departamento de Ciencias Marinas, UPRM

⁵ Estudiante de Bachillerato en Ingeniería Civil, UPRM

coupling technique was developed to integrate the storm surge model results into the hydrologic model. The results show that the combined effect of storm surge penetration and inland runoff produced by heavy rainfall deposited by hurricane Georges increased flood levels in the coastal zone. Without considering these effects, flood levels provided by tides and wind driven circulation models only, could underestimate the real hazard conditions. The net effect depends on the watershed conditions, the spatial and temporal distribution of rainfall and the local conditions of the river morphology near the coastline. Even though peak discharge is usually used as an indicator of hazard conditions and regulations promote zero increase in peak discharge, water volumes play a major role in water levels during flood conditions. This is more important during storm surge because ocean water penetrates inland, increasing water volumes and flood depths.

Keywords: coastal flooding, circulation models, hydrologic models, hurricane Georges, surface runoff, storm surge.

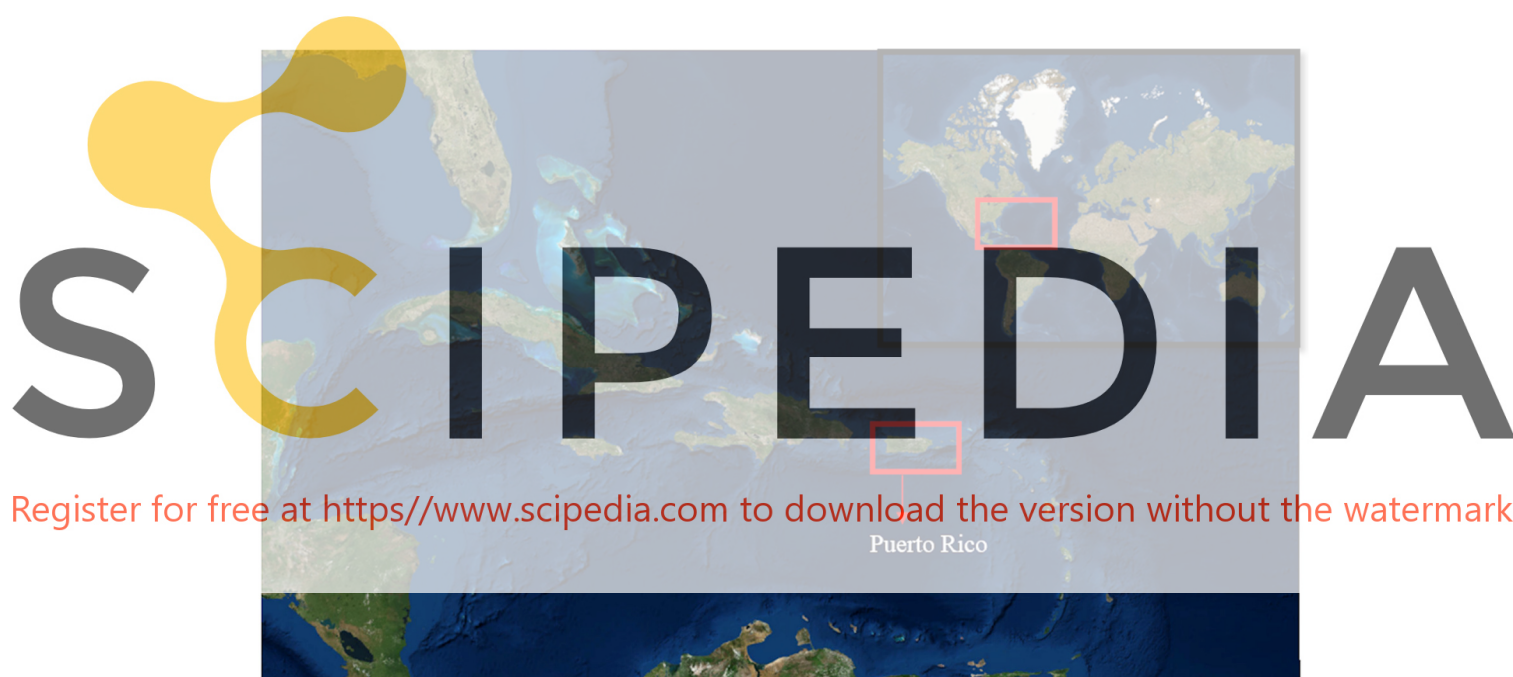


Figura 1: Localización de Puerto Rico dentro del Caribe. Puerto Rico se muestra dentro del marco de color rojo.

INTRODUCCIÓN

Un huracán se define como una masa de aire en circulación cerrada atmosférica tropical, en el cual la velocidad de sus vientos sostenidos sobrepasa los 87 km/h (NHC, 2009). La zona atlántica que incluye el Océano Atlántico, el Golfo de México y el mar Caribe, es una de las más propensas a la formación de huracanes (Ramírez, 2010). El origen de la mayoría de las tormentas ocurre cerca de Cabo Verde en las costas de África y usualmente se convierten en huracán antes de alcanzar el mar Caribe (Ramírez, 2010). Las Antillas mayores, incluyendo Puerto Rico (PR), se encuentran en una zona susceptible al impacto de huracanes (véase la Figura 1 para localización).

Según los archivos de la Oficina del Pronóstico del Clima de Puerto Rico (PRWFO por sus siglas en inglés), existe evidencia documentada de impactos de huracanes y tormentas tropicales desde julio de 1515 (PRWFO, 2012). Durante el siglo XX cinco de los huracanes más destructivos han impactado a Puerto Rico (El Nuevo Día, 2013). Sus trayectorias sobre PR se muestran en la Figura 2. Sus impactos sobre PR son descritos brevemente a continuación.

- Huracán San Felipe II (13/9/1928): fue clasificado como huracán de Categoría 5 que significa que alcanzó vientos con velocidades sobre 257 km/h al pasar por la Isla. Este huracán fue clasificado como el más intenso y letal en impactar a PR. Causó 312 muertes y los daños totales se estimaron en \$50 millones.
- Huracán San Cipriano (27/9/1932): fue clasificado como huracán de Categoría 3 que significa que alcanzó vientos con velocidades sobre 193 km/h cuando pasó por PR. Este huracán se mantuvo en la isla por aproximadamente siete horas. Causó 225 muertes y los daños totales se estimaron en \$1.5 millones.
- Huracán Santa Clara (11/8/1956): fue clasificado como huracán de Categoría 1 cuando tocó tierra en PR. Causó 16 muertes y los daños totales se estimaron en \$40 millones.
- Huracán Hugo (18/9/1989): fue clasificado como huracán de Categoría 4 cuando llegó a PR. Hubo un total de 100,000 refugiados en los albergues, de los cuales 13,000 se quedaron sin hogar. Causó dos muertes y los daños totales se estimaron en \$1,000 millones.
- Huracán Georges (21/9/1998): fue clasificado como huracán de Categoría 3 trayendo vientos sobre 185 km/h cuando arribó a PR. No causó ninguna fatalidad pero los daños totales se estimaron en \$6,000 millones.



Figura 2: Trayectoria de los cinco huracanes más destructivos que impactaron a Puerto Rico durante el siglo XX. Los colores representan trayectorias de huracanes distintos. (Intersection of Severe Weather, Climate and Society, 2010).

La práctica común de usar modelos de circulación oceánica para desarrollar mapas que delimitan los niveles de inundación provocados por la marejada durante el paso de un evento de circulación ciclónica no considera los volúmenes y caudales de agua producidos por la precipitación que usualmente acarrearán las tormentas tropicales y los huracanes. En este sentido se debe promover la integración entre los ingenieros de costas y los ingenieros hidráulicos para acoplar los efectos de marejada con los de precipitación. El propósito de este estudio fue evaluar los efectos combinados del aumento en los niveles del océano debidos a la marejada ciclónica y la escorrentía superficial generada por las torrenciales lluvias que ocurren simultáneamente en los terrenos ubicados cerca de las zonas costeras. Específicamente se estudió el caso del huracán Georges al entrar a Puerto Rico por la costa Este de la Isla.

El proyecto se realizó mediante el acoplamiento de un modelo de circulación oceánica de alta resolución (ADCIRC + SWAN) y un modelo hidrológico bidimensional (GSSHA). La combinación de ambos efectos permitió comparar los niveles de inundación producidos sin el efecto de la escorrentía superficial y con el efecto de la escorrentía superficial. El huracán Georges fue seleccionado ya que tuvo un impacto directo en la Isla, causó daños extremos y se tienen datos climatológicos para realizar este estudio. Los resultados muestran que la

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

Según el registro histórico, el huracán Georges fue el huracán más destructivo en impactar a Puerto Rico, excedido solo por el huracán San Cipriano en el 1932 (Bennett and Mojica, 2009). Según Guiney (1999), Georges fue el segundo huracán más letal y fuerte dentro de la cuenca del Atlántico para la temporada del 1998. Durante sus 17 días de travesía tocó tierra siete veces y produjo 602 fatalidades, principalmente en República Dominicana y Haití. Georges se originó a partir de un disturbio atmosférico en la costa oeste de las islas de Cabo Verde. El sistema se convirtió en una tormenta tropical el 16 de septiembre a las 12:00 UTC, mientras su centro de circulación se localizaba a 998 kilómetros del oeste de las islas de Cabo Verde (Guiney, 1999). Durante el próximo día Georges se fortaleció gradualmente hasta alcanzar intensidad de huracán. La intensidad máxima de Georges se estima que fue de huracán Categoría 4 con vientos sostenidos de 250 km/h para el 20 de septiembre a las 6:00 UTC, mientras su centro de circulación se localizaba a 459 kilómetros del este de Guadalupe en las Antillas Menores (Guiney, 1999). Georges entró por el sureste de Puerto Rico en la noche del 21 de septiembre con vientos sostenidos de 185 km/h (categoría 3) (Guiney, 1999). Este huracán cruzó la isla de PR de Este a Oeste el 22 de septiembre, mientras que, a su vez, se debilitó ligeramente. Ya en el continente Georges tocó tierra cerca de Biloxi, Mississippi, en la mañana del 28 de septiembre como huracán de Categoría 2 y se disipó cerca de la costa noreste de Florida en la mañana del 1 de octubre (Guiney, 1999). El periodo de tiempo de la trayectoria seleccionada para este estudio fue desde el 21 al 23 de septiembre de 1998; periodo durante el cual se movió sobre PR.

48 Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 17(1-2)

oficial máxima en 48 horas sobre la Isla de 625 mm, los cuales cayeron en Villalba, en la cordillera central (Guiney, 1999). Según una estación pluviométrica en el municipio de Jayuya cayeron 720 mm en 48 horas (Guiney, 1999). En la Figura 3 se puede observar la precipitación acumulada durante el paso del huracán Georges para el periodo del 21 al 22 de septiembre de 1998 (Torres-Sierra, 2002). Georges produjo daños en todos los sectores de la isla; incluyendo los servicios vitales, agricultura, transportación y otra infraestructura. El 96% de la isla (1.3 millones de clientes) perdieron los servicios de electricidad y el 75% de la isla (1.83 millones de clientes) perdieron los servicios de agua potable y sanitario (Bennett and Mojica, 2009). También los daños a las carreteras, debido a inundaciones o destrucción, fueron estimados en \$22 millones. En el sector agrícola la Isla perdió el 75% de sus cosechas de café, el 95% de las cosechas de plátanos y el 65% de sus aves de corral vivas (Bennett and Mojica, 2009). En este sector las pérdidas totales fueron estimadas en \$212.9 millones. En el sector de vivienda, un total de 28,005 hogares fueron destruidos completamente y 72,605 hogares fueron parcialmente destruidos (Bennett and Mojica, 2009). Además, las escuelas públicas sufrieron pérdidas que ascendieron entre \$20 y 25 millones. Finalmente, los daños totales fueron estimados en \$1,907,026,374 (Bennett y Mojica, 2009). Por la complejidad de la situación no fue posible separar daños ocurridos por los vientos y daños debidos a inundaciones; sin embargo, ambos efectos fueron de gran intensidad.

ÁREA DE INTERÉS

La siguiente sección describe la localización y región fisiográfica del área de interés (ADI). Luego se describen las características del suelo, los usos del terreno y la hidrografía.

Localización y región fisiográfica

El área de interés (ADI) se localiza entre los municipios de Fajardo y Ceiba, en la costa este de Puerto Rico. Hidrográficamente, el ADI abarca desde la cuenca de la quebrada identificada como “*Quebrada Sin Nombre-1959*” (QSN-1959) hasta la cuenca de la quebrada Aguas Claras. La Figura 4 muestra la demarcación de las cuencas con sus sistemas de ríos, quebradas y mangles. El ADI incluye la cuenca hidrográfica de los siguientes sistemas: QSN-1959, río Demajagua, quebrada Ceiba y quebrada Aguas Claras. Según Guiney (1999) la máxima marejada ciclónica ocurrió cerca de la costa de Fajardo, con aproximadamente 3.05 m (10 ft) de altura. La lluvia acumulada para los días 21 y 22 de septiembre en el ADI fue aproximadamente 125 mm (5 in) (Guiney, 1999). El área total es aproximadamente 19.69 km² (4,865.5 acres/ 7.60 mi²) e incluye varios desarrollos urbanos.

Cubierta del uso del terreno y del tipo de suelo

Según la Junta de Planificación de Puerto Rico (JPPR, 2006) la cubierta del uso del terreno que predomina dentro del ADI es “Pastos y Arbustos” cubriendo un 59% del total del área. Seguido por el uso de terreno clasificado como “Bosques y Arboledas” con un 27%, “Desarrollos Urbanos” cubren aproximadamente un 11% y “Humedales” cubren cerca de un 3%. En la Figura 5 se muestra una imagen de la cubierta del uso de terreno dentro del ADI. Una lista completa de las cubiertas de uso de terreno dentro del ADI se muestra en la gráfica de la Figura 6.

Según el Servicio Federal de Conservación de Recursos Naturales (conocido como NRCS por sus siglas en inglés) (NRCS, 2004) la cubierta del tipo de suelo que predomina dentro del ADI es la marga limosa arcillosa de Naranjito, caracterizado por pendientes con alta capacidad de erosión, entre 20% y 40%, clasificado como NaE2, cubriendo un 16% del total del área. En segundo lugar de cobertura está la marga limosa arcillosa de Naranjito, el cual es un suelo con pendientes con alta capacidad de erosión entre el 40% y 60%, clasificado como NaF2, y que cubren con un 13%. Otros suelos que cubren áreas menores son la marga arcillosa de Caguabo (CbF2), 10% y la arcilla de Humatas (HtE2), 8%. Una lista completa de las cubiertas de tipo de suelo dentro del ADI se muestra en la gráfica de la Figura 6.

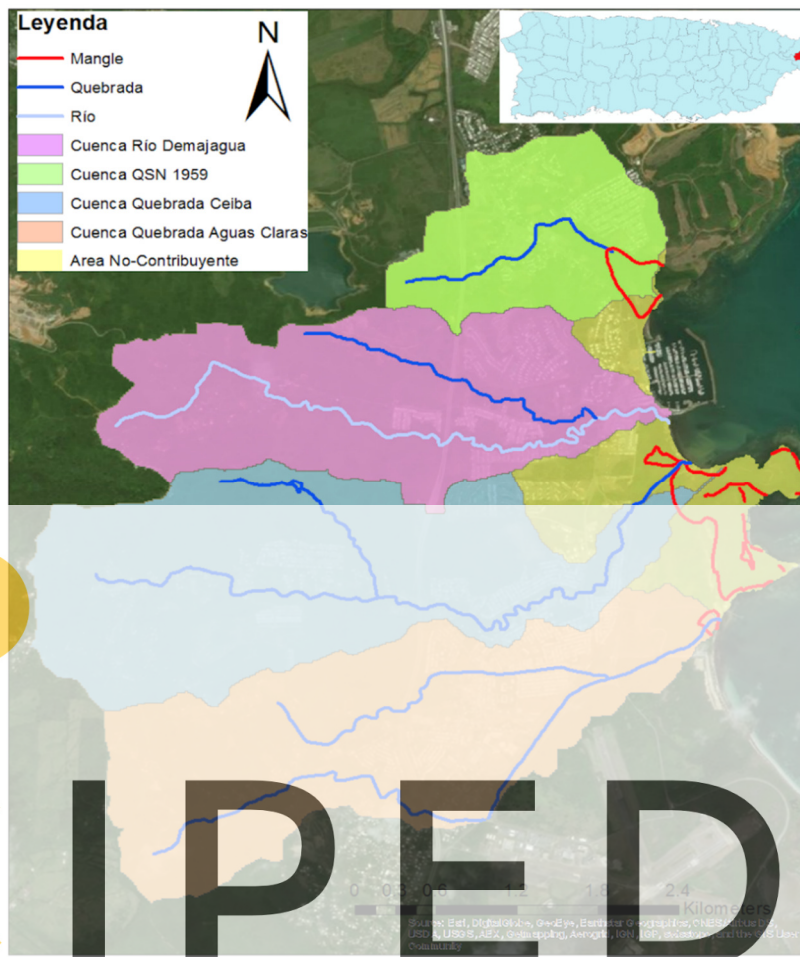


Figura 4: Área de interés con sus distintas cuencas hidrográficas, ríos, quebradas y mangles (CRIMPR, 2006).

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

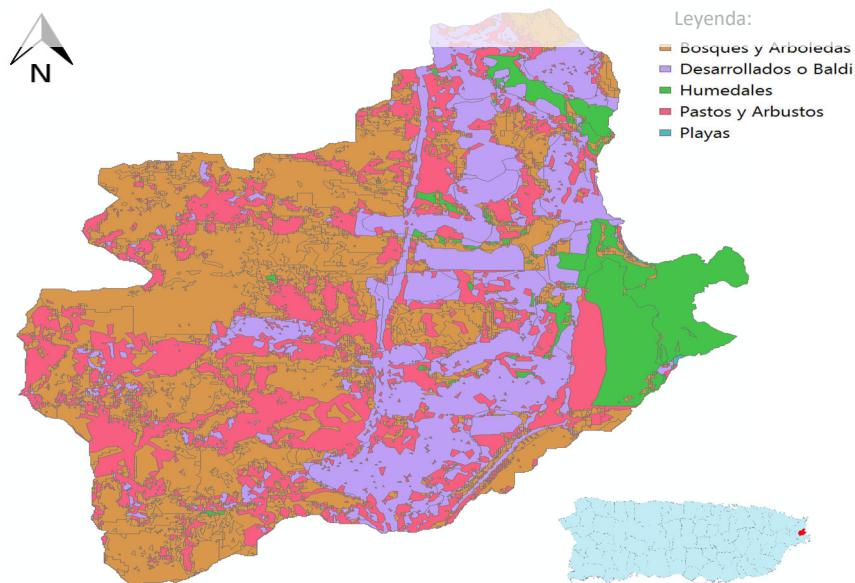


Figura 5: Cubierta del uso de terrenos dentro del área de interés (JPPR, 2006).

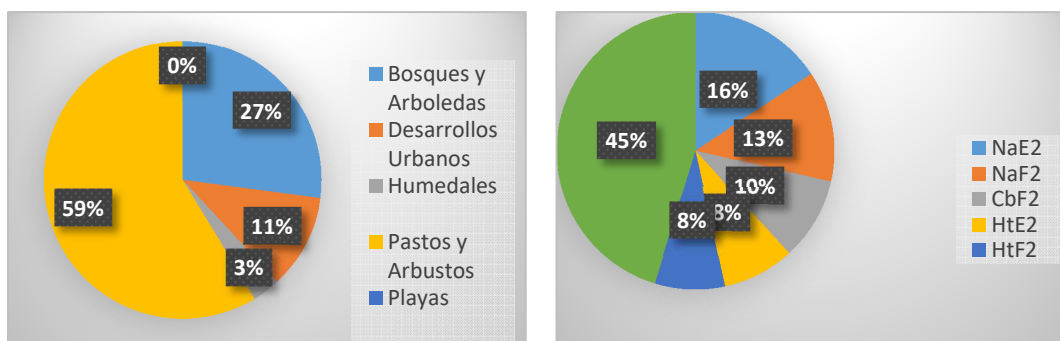


Figura 6: Cubierta de usos de terreno (izquierda) y tipo de suelo (derecha) para el área de interés (JPPR, 2006; NRCS 2004).

Hidrología de agua superficial

Cada una de las cuencas drena hacia un sistema de río o quebrada con múltiples ramificaciones (CRIM, 2006). La Figura 4 presenta la delineación de las cuencas y sus tramos principales. La Tabla 1 resume los parámetros geométricos de cada cuenca, en donde QSN representa “Quebrada Sin Nombre”. La cuenca de Ceiba posee la mayor área de captación con 5.81 km². La cuenca con la pendiente más brusca es la cuenca de Demajagua con 0.24 m/m. También la cuenca de Ceiba tiene la mayor longitud de cuenca con 5.32 km y tiene el punto más alto de elevación con 297 m sobre el nivel promedio del mar (MSL, por sus siglas en inglés).

Tabla 1: Parámetros geométricos de las cuencas dentro del ADI.

Parámetros/ Cuenca	QSN 1959	Demajagua	Ceiba	Aguas Claras
Área (km ²)	2.14	4.4	5.81	5.45
Pendiente Cuenca (m/m)	0.1676	0.2355	0.2228	0.1579
Longitud Cuenca (km)	2.06	4.23	5.32	4.8
Perímetro (km)	8.37	14.23	18.35	16.49
Elevación Máxima (m-MSL)	136.53	290.56	296.83	282.11
Elevación Promedio (m-MSL)	31.02	78.43	92.76	74.66

METODOLOGÍA

La metodología desarrollada para este estudio se describe en los siguientes pasos:

- Seleccionar el área de interés (ADI) para el estudio propuesto. El ADI para este caso cubre la zona costera por donde el huracán Georges entró a Puerto Rico como un huracán de categoría III. Varias comunidades, marinas y reservas naturales fueron impactadas en el ADI.
- Recolectar la información necesaria para desarrollar el modelo hidrológico y el modelo de marejada ciclónica. Los detalles sobre la información requerida para ambos modelos se presentan más adelante.
- Realizar un reconocimiento de campo del ADI. Esto incluye documentar la vegetación, los cauces y medir las secciones transversales de los cauces en puntos específicos.

- Seleccionar los modelos computacionales. Las extensas áreas con varias cuencas hidrográficas requieren el uso de modelos hidrológicos bidimensionales, estructurados y espacialmente variados. El modelo hidrológico bidimensional GSSHA (Downer y Ogden, 2006) fue seleccionado debido a su capacidad para manejar condiciones de frontera dinámica en la costa. Esto permite una simulación precisa de la interacción entre el océano y los cuerpos de agua dulce. El modelo hidrológico debe ser acoplado con un modelo de marejada ciclónica. Los campos de oleaje de tormenta y la marejada ciclónica fueron calculados utilizando el modelo de circulación ADCIRC + SWAN (Luettich et al., 1992).
- Acoplar ambos modelos para determinar los efectos de inundación causados por los siguientes escenarios de inundación dentro del área de interés: escorrentía superficial solamente y escorrentía superficial más marejada ciclónica. Los niveles de marea de una red de alta resolución desarrollada en ADCIRC + SWAN se introducen como condiciones de frontera de series de tiempo en GSSHA. La variación de tiempo y la distribución espacial y temporal de la lluvia obtenida de la reflectividad del radar se vierte sobre el ADI de manera sincronizada. El resultado es una simulación totalmente dinámica que combina simultáneamente inundaciones debido a la escorrentía superficial producida por la lluvia y producida por la marejada ciclónica.
- Actualizar los mapas de uso de la tierra para representar las condiciones durante el período del evento. En este caso, la cobertura del uso de la tierra disponible es a partir de 2006; por lo tanto, fue revisado y modificado como corresponde para representar las condiciones de 1998.
- Calibrar y validar el modelo. Se deben considerar varios parámetros; sin embargo, existen limitaciones de datos y no siempre es posible tener una calibración tan buena como se desearía. Los datos de radar se compararon y se calibraron usando datos de estaciones de precipitación limitadas para este caso. No había estaciones de medición de caudal disponibles dentro del área de interés. Se incluyó un análisis de sensibilidad para los parámetros del modelo hidrológico.
- Analizar la información. El análisis incluyó comparación de zonas inundadas, volúmenes de agua e inundaciones.

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

El resto de esta sección presentará detalles del modelo hidrológico desarrollado para esta investigación. Se provee una breve introducción de modelo “Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis” (GSSHA). Esto es seguido por la descripción de los datos necesaria para desarrollar un modelo hidrológico y la calibración del modelo hidrológico. Además, se presentan detalles sobre el modelo de circulación utilizado ADCIRC + SWAN. Por último, se presenta la técnica de acoplamiento escogida para juntar los efectos de ambos modelos.

Modelo hidrológico

GSSHA es un modelo hidrológico físico de parámetros distribuidos. Este es un modelo distribuido de dos dimensiones desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE, por sus siglas en inglés). Para la distribución espacial se utiliza una cuadrícula o malla uniforme. Los resultados del modelo dan la respuesta hidrológica de una cuenca sujeta a datos de entrada hidro-meteorológicos.

Según Downer y Ogden (2006), el propósito principal de GSSHA es simular los procesos hidrológicos de una cuenca. Para poder cumplir con su propósito, el modelo es capaz de estimar flujos, profundidades de agua y humedad del suelo en una variedad de regímenes y condiciones hidrológicas. Por ser un modelo bidimensional permite cubrir la superficie del terreno con precisión, usar datos de precipitación obtenidos con radar. Además se pueden usar cambios de las variables en tiempo y espacio como condiciones de frontera. Estas características son necesarias para una correcta simulación hidrológica de eventos de lluvia durante condiciones de marejada ciclónica.

Datos para el modelo hidrológico

Los datos que se deben usar en el modelo hidrológico incluyen las siguientes categorías: variación espacial y temporal de la precipitación obtenida del radar, modelo de elevación digital, cubierta del uso de terreno y el tipo de suelo de las cuencas, secciones transversales de los cuerpos de agua principales y, coeficiente de rugosidad superficial. A continuación, se presenta una descripción de cada uno de estos datos.

1. Datos de Precipitación

La precipitación obtenida de los radares es distribuida sobre la superficie y produciendo un hietograma o “pluviómetro virtual” en cada celda del terreno. En este estudio se usó un tamaño de celda de 10 m x 10 m (ver próxima sección). La precipitación fue obtenida a partir de la reflectividad medida con el radar NEXRAD WSR-88D ubicado en Cayey, PR. Los datos se obtuvieron del Centro Nacional para Información Ambiental (NCEI, 2016). Se utilizó la lluvia a intervalos de 6 minutos durante la simulación. La Figura 7 presenta la imagen de reflectividad producida por el radar durante un instante del paso del huracán.

El hietograma promedio de la cuenca, obtenido cuando se concentra la lluvia en su centroide, da una idea de la distribución temporal y la magnitud de la precipitación. La Figura 8 muestra el hietograma de la lluvia depositada por el Huracán Georges sobre la cuenca del Río Demajagua a intervalos de una hora los días 21 y 22 de Setiembre de 1998, (48 horas), obtenido de los datos de radar. La precipitación acumulada fue 155-mm en 48 horas.

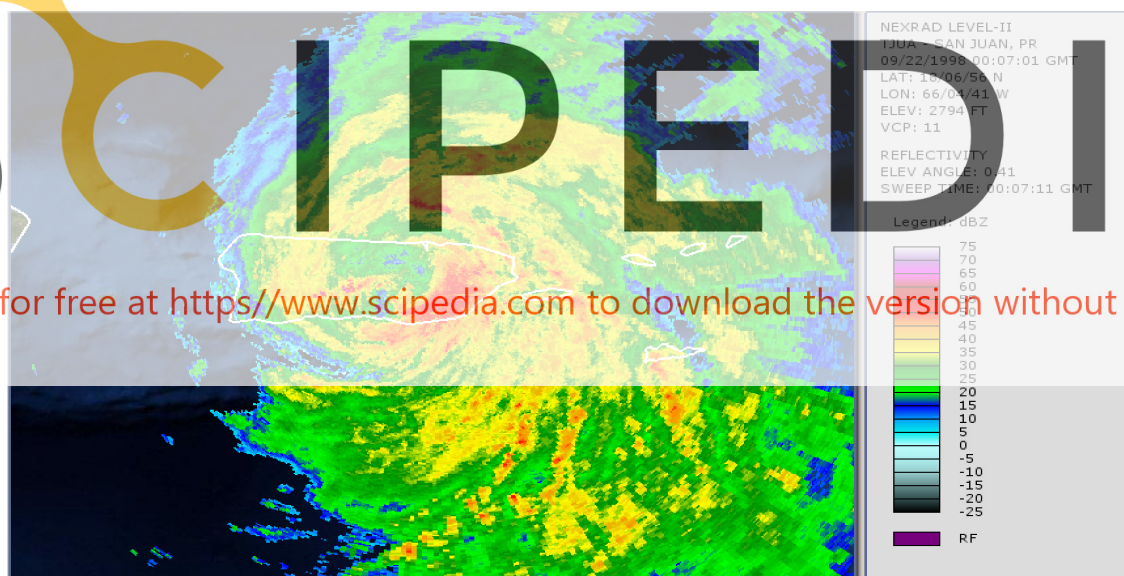


Figura 7: Reflectividad sobre Puerto Rico durante el paso del huracán Georges para el 22 de septiembre de 1998 a las 00:07:01 UTC. (NCEI, 2016b).

2. Modelo de Elevación Digital

El modelo de elevación digital es una representación tridimensional de la superficie del terreno. La resolución del modelo de elevación digital es el tamaño de la celda o área usada para describir la topografía. El Centro Nacional para la Información Ambiental (NCEI, por sus siglas en inglés) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (conocida como NOAA por sus siglas en inglés) ha desarrollado mapas de elevación digital de diferente resolución para Puerto Rico. Para la isla completa existen mapas de 30 m y de 90 m de resolución. Además en las zonas costeras existen mapas de 10 m de resolución. El mapa utilizado para esta investigación fue el de 10 m de resolución para la costa de Fajardo (Taylor et al., 2008).

3. Secciones transversales del canal del río

Detección y Alcance de Luz (LIDAR, por sus siglas en inglés) es un método de teledetección que utiliza luz en la forma de un rayo láser para medir distancias a la superficie de la tierra (National Ocean Service, 2015). La Oficina para Manejo Costero de la NOAA posee datos de LIDAR con una precisión vertical de 18.6 cm y una precisión horizontal de 100 cm con un espaciamiento nominal de 1.0 m entre cada punto (USACE, 2007). Estos datos fueron procesados para obtener un mapa de elevación digital de 1 m de resolución. Este mapa de alta resolución se consideró apropiado para obtener secciones transversales de los cauces de agua necesarios para el rastreo hidrológico. Un ejemplo de una sección transversal obtenida del mapa de 10 m de resolución para el canal de la Quebrada Aguas Claras cerca de su desembocadura se muestra en la Figura 9. Las secciones transversales de los canales obtenidos del LIDAR se corroboraron con secciones transversales obtenidas mediante levantamiento topográfico de campo y compararon satisfactoriamente.

4. Cubierta del uso de terreno:

El Recinto de Río Piedras de la Universidad de Puerto Rico y la Junta de Planificación de Puerto Rico publicaron un mapa de la cubierta del uso de terreno para Puerto Rico con fecha del 2006 (ver Figura 5). La cubierta del uso del terreno se utilizó para asignar los coeficientes de rugosidad superficial para el flujo sobre el terreno. Imágenes satelitales del USGS se utilizaron para modificar esta cubierta del uso de terrenos de forma que se ajustara a las condiciones de 1998.

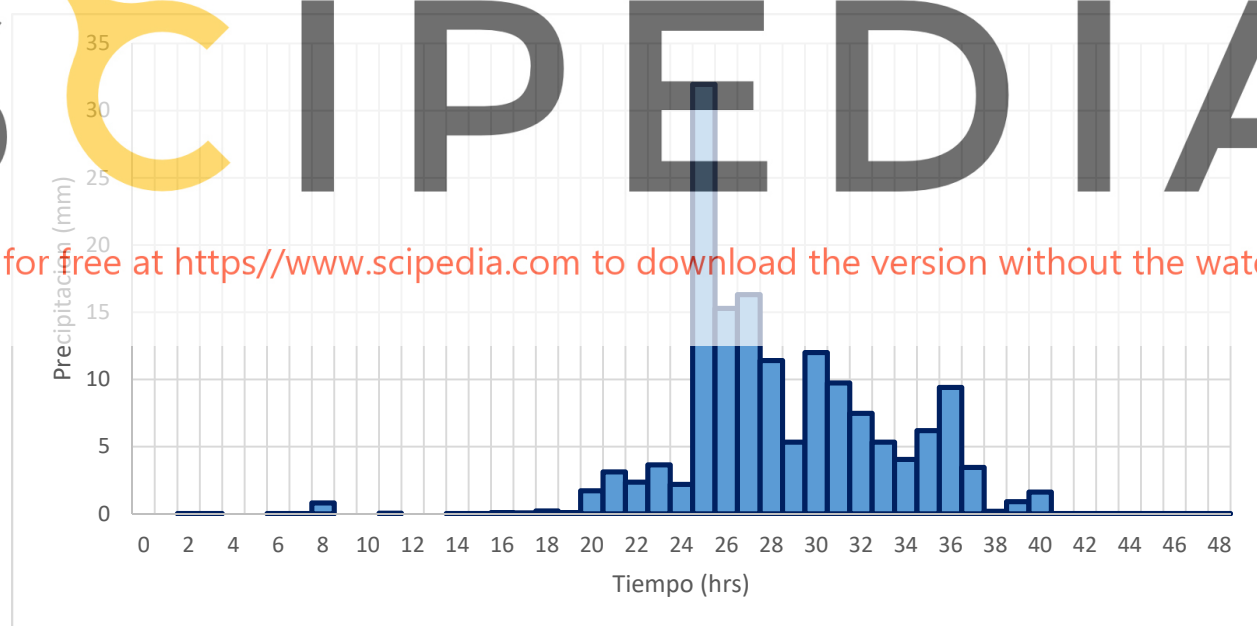


Figura 8: Histograma promedio sobre la cuenca del Río Demajagua durante 48 horas (21 y 22 de setiembre de 1998) obtenido de los datos de radar.

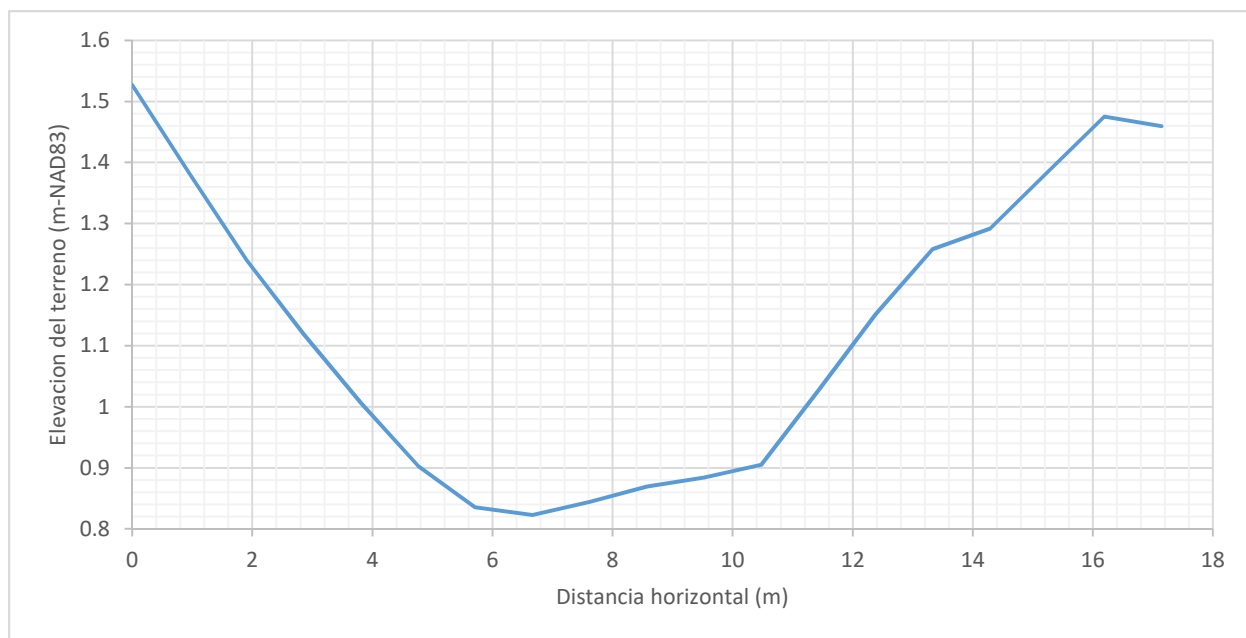


Figura 9: Ejemplo de una sección transversal obtenida del LIDAR para canal de la quebrada Aguas Claras cerca de su salida. (USACE, 2007).

5. Mapa de tipos de suelo:

El mapa de tipos de suelo utilizado fue creado por el NRCS para las condiciones del año 2004. La conductividad hidráulica, textura del suelo, punto de marchitez y humedad inicial fueron obtenidos de la página electrónica del “Web Soil Survey”, el cual es una herramienta electrónica del NRCS. Estos parámetros adicionales están disponibles como parte de la base de datos conocida como “SSURGO”. La información para calcular la infiltración fue obtenida del estudio de Rawls et al. (1983) y de Ogden and Saghafian (1997). Estos datos fueron utilizados en el modelo de infiltración de Green-Ampt. Algunos de los parámetros utilizados para el modelo de infiltración se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros utilizados para el modelo de infiltración de Green-Ampt en el modelo hidrológico (Rawls et al., (1983); Ogden and Saghafian, 1997).

Parámetro/ Tipo de Suelo	Arcilla	Arcilla Gravosa	Marga	Arcilla Marga	Arcilla Empedrada
Conductividad Hidráulica (cm/hr)	50.76	1.8	10.08	0.972	0.36
Carga Capilar (cm)	9.62	42.43	17.5	40.89	46.65
Porosidad (m³/m³)	0.437	0.398	0.463	0.464	0.43
Índice de Distribución de Poro (cm/cm)	0.694	0.319	0.252	0.242	0.223
Saturación Residual (m³/m³)	0.02	0.068	0.027	0.075	0.109
Capacidad de Campo (m³/m³)	0.188	0.265	0.281	0.307	0.362
Punto de Marchitez (m³/m³)	0.044	0.135	0.088	0.13	0.216

6. Coeficientes de rugosidad de la superficie

El coeficiente de rugosidad de la superficie se utiliza en la ecuación de Manning y es una medida de la resistencia ofrecida por la superficie contra el movimiento del agua y se necesita para estimar el flujo de agua sobre la superficie del terreno y sobre los cauces de agua (Phillips y Tadayon, 2006). Estos valores varían para los valles

de inundación entre 0.050 a 0.460 para desarrollos urbanos pequeños hasta bosques maduros secundarios en tierras bajas, respectivamente. Por otra parte, los valores oscilan entre 0.04 a 0.045 para el fondo de los canales de los ríos. Los datos se obtuvieron de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA por sus siglas en inglés) (2009), Halgren (2012) y Kalyanapu et al. (2009).

Tabla 3: Coeficientes de rugosidad de la superficie para distintas cubiertas de usos de suelo utilizados en el modelo hidrológico (Kalyanapu et al., 2009; Halgren, 2012).

Tipo de Cubierta del Uso de Suelo	Coeficientes de Rugosidad de la Superficie
Bosque Aluvial Semi-caducifolio de Tierras Bajas	0.450
Matorral Aluvial de Tierras Bajas	0.400
Bosque No Calcáreo Semi-caducifolio de Tierras Bajas	0.360
Bosque Aluvial Perenne de Tierras Bajas	0.453
Bosque de Mangles	0.410
Gramas y Pastos	0.340
Humedal Salino Herbáceo	0.086
Desarrollo Urbano de Alta Intensidad	0.150
Desarrollo Urbano de Baja Intensidad	0.050
Bosque Ribereño de Tierras Bajas	0.420
Barreras Artificiales	0.030

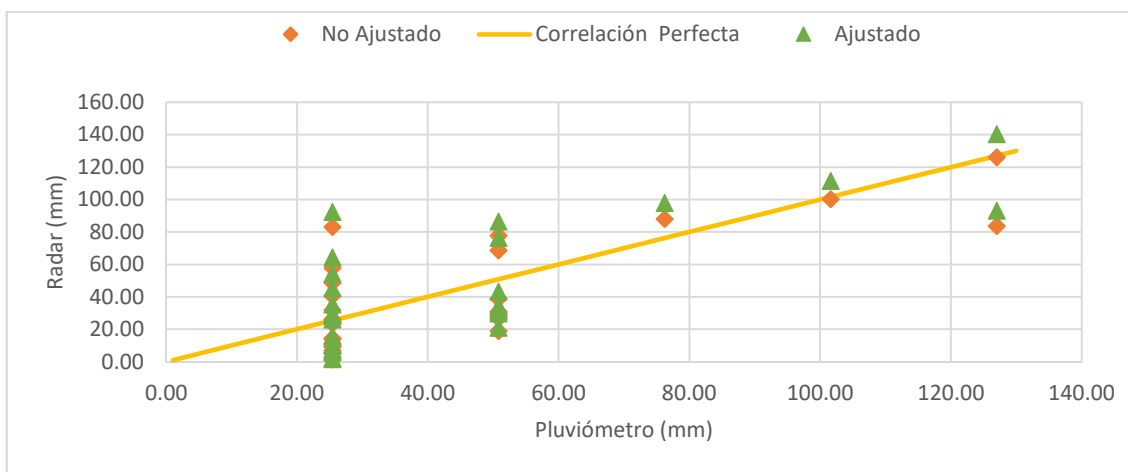


Figura 10: Correlación entre la precipitación del pluviómetro y precipitación del radar para la data no ajustada y la data ajustada (National Center for Environmental Information, 2016a).

Calibración del modelo hidrológico

La metodología de calibración para el modelo hidrológico se dividió en dos categorías: calibración de datos de la precipitación del radar y calibración del caudal. Para la calibración de la precipitación de radar se utilizó el método de calibración conocido como el Sesgo de Campo Medio (“Mean Field Bias Method” en inglés) (Bedient et al., 2008). Este método elimina los errores sistemáticos en las estimaciones de radar utilizando datos de acumulación de pluviómetros. Cuando se utiliza este método, el sesgo se refiere a que el radar está sobrestimando o subestimando la precipitación en comparación con las acumulaciones de los pluviómetros. Las mediciones de la lluvia fueron obtenidas de un pluviómetro ubicado en el aeropuerto de Fajardo (NCEI, 2016a) (ID de la estación COOP 663657). La comparación de la precipitación de radar con la precipitación medida del pluviómetro demostró que los datos del

radar subestiman la precipitación del pluviómetro por un 11%. La Figura 10 muestra una representación gráfica de la correlación entre la precipitación medida en el pluviómetro y la precipitación estimada por el radar para los datos no ajustados y ajustados, en donde los datos ajustados se refieren a los datos no ajustados multiplicados por factor de corrección obtenido de la calibración. La calibración de la precipitación ocurrió para el periodo de tiempo entre el 21 de septiembre de 1998 a las 17:00 GMT y el 22 de septiembre de 1998 a las 2:15 GMT. La localización la estación pluviométrica utilizada para la calibración se muestra en la Figura 11.

Para poder calibrar el caudal, se debe contar con caudales medidos desde una estación de monitoreo para el periodo de estudio. Durante el paso del huracán la mayoría de las estaciones salieron de operación ya sea porque fueron destruidas por los vientos o las escorrentías o dejaron de funcionar por fallos mecánicos o falta de energía. La única información disponible de caudal es de la estación 50070500 del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), la cual está localizada aproximadamente a 6.8 kilómetros de la cabeza del Río Fajardo (véase la Figura 11). La cuenca de la estación de monitoreo pertenece a una pequeña porción de la cuenca del Río Fajardo en su parte más alta. Debido a la remota localización, los usos de terreno y los tipos de suelo de la cuenca de la estación de monitoreo no son representativos con ninguno de los que se encuentran dentro del área de interés. Por lo tanto, el intento de calibración de caudal del modelo con los datos disponibles no proporcionó resultados útiles para el propósito de este estudio. A falta de esta información se hizo un análisis de sensibilidad de los resultados para determinar el efecto de los parámetros en la respuesta del modelo. Para este análisis se tomaron en consideración las siguientes variables: la conductividad hidráulica, el coeficiente de rugosidad superficial y la humedad inicial del suelo.

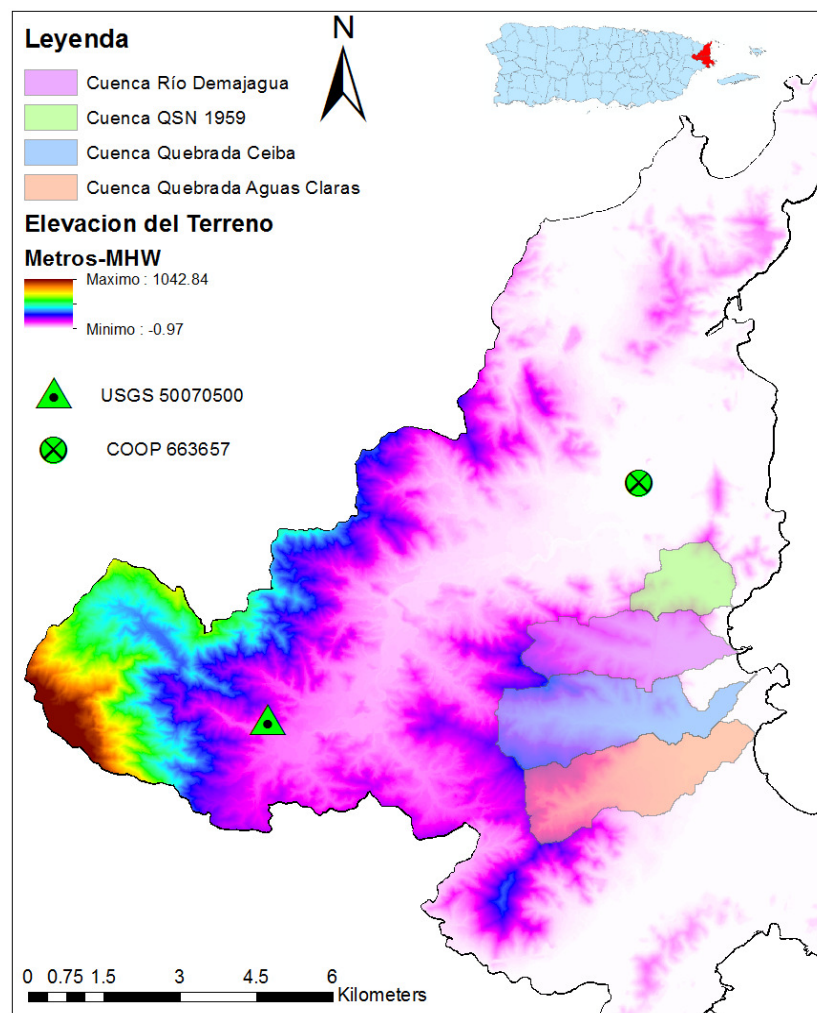


Figura 11: Localización de la estación de monitoreo de caudal y del pluviómetro en referencia al área de interés. Se muestra la elevación del terreno en metros y con referencia al promedio de alto del agua (MHW, por sus siglas en inglés) (Taylor et al., 2008).

Modelo de marejada ciclónica

Los campos de olas de huracán y marejada ciclónica fueron calculados utilizando el modelo ADCIRC + SWAN. ADCIRC es un modelo numérico de circulación hidrodinámica que simula niveles de agua y corrientes sobre un dominio formado por una malla computacional no estructurada (Dietrich et al., 2010). Por otra parte, SWAN es utilizado para simular olas aleatorias generadas por el viento (Dietrich et al., 2010). La combinación ADCIRC + SWAN ha sido utilizada extensamente y validada para mareas, marejadas ciclónicas, campos de olas de huracán y corrientes barotrópicas en ambientes diversos tales como Luisiana, Texas, Mississippi, Florida y Puerto Rico (Westerink et al., 2008; Funakoshi et al., 2008; Bunya et al., 2010; Dietrich et al., 2011; Hope et al., 2013; González-López et al., 2015).

En este estudio se utilizó una malla computacional de alta resolución (PRVI2015) de 100 m a lo largo de la costa de Puerto Rico y las Islas Vírgenes Estadounidenses (IVEU) (González-López, 2015). El dominio de la malla se extiende desde el norte del océano Atlántico hasta Brasil; permitiendo resolver rangos dinámicos de escalas que van desde cientos de kilómetros, en las cuencas de los océanos, hasta décimas de metros en áreas cerca de las costas. En la vecindad de PR y las IVEU la malla tiene una representación detallada de las profundidades y geometrías de características costeras importantes tales como: arrecifes, bancos de arenas y manglares. En la Figura 12 se pueden observar los siguientes detalles de batimetría, representados por los colores: la larga cadena de arrecifes que va desde Fajardo hasta la isla de Culebra, el gran banco de arena en el noreste de la isla de Vieques y la compleja estructura de la batimetría en la costa. Esta malla también incluye las zonas clasificadas como hábitats bentónicos y coberturas de mangles (Kendall et al., 2001; Giri et al. 2011); tomando en consideración sus efectos de fricción mediante la asignación de coeficientes de rugosidad de Manning para cada una de las clasificaciones del fondo (González-López, 2015). Además se asignaron valores de coeficientes de rugosidad de Manning para las distintas clasificaciones del uso de terreno. También se asignó un largo de rugosidad direccional para la reducción de vientos debido a los efectos del uso de terreno (Bunya et al., 2010).

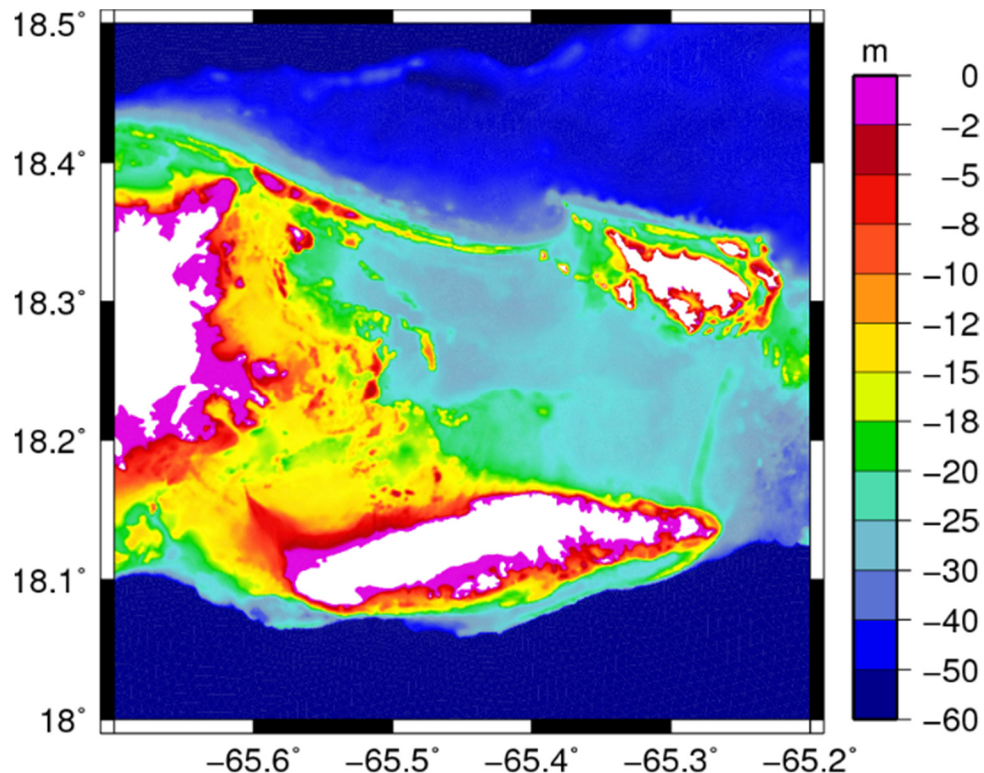


Figura 12: Detalles de la malla PRVI2015 en la costa este de Puerto Rico

En la Figura 13 se muestra la elevación de la superficie simulada por el modelo ADCIRC + SWAN, la elevación de la superficie armónica pronosticada por el NOAA (“Harmonic Tides”) y la elevación de la superficie observada (“Observed”) en la estación 9755371 de la NOAA durante el paso del huracán Georges, localizada en la Puntilla en San Juan. En la Figura 13 se muestra la localización de la estación de NOAA (NOAA, 2016). El modelo tuvo una excelente congruencia con la marejada ciclónica observada, alcanzando un máximo de marejada de 0.8 m sobre el nivel promedio del mar. La marea alta no coincidió con el tiempo de la marejada máxima, lo cual contribuyó a que la marejada fuera menos de lo pensado si el tiempo de la marejada máxima hubiese coincidido con la marea alta. ADCIRC + SWAN calculó un máximo de elevación de la superficie del agua (véase la Figura 14) de más de 1.5 m sobre el nivel promedio del mar. La penetración de la marejada ciclónica tierra adentro es significativa. En algunas localizaciones, como en el municipio de Ceiba (véase la Figura 14), la marejada ciclónica alcanzó la frontera terrestre de la malla computacional. La acumulación de la marejada ciclónica en esta localización fue causada por los fuertes vientos de huracán orientados perpendicularmente sobre esta área.

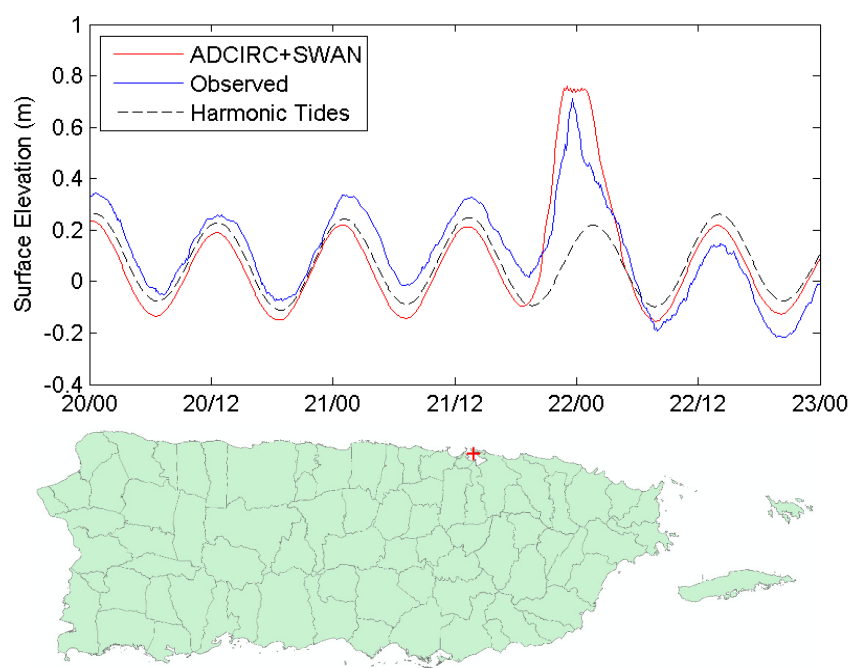


Figura 13: Elevación de la superficie de agua para el modelo de ADCIRC+SWAN, la predicción de la NOAA y los datos observado durante el paso del huracán Georges sobre el área de San Juan, PR (Arriba). Localización de la estación de monitoreo 9755371 de la NOAA en la bahía de San Juan (se muestra en color rojo (Abajo) (NOAA, 2016).

Técnica de acoplamiento

Para poder acoplar el modelo hidrológico con el modelo de marejada ciclónica primero se realizó una simulación del modelo de circulación ADCIRC + SWAN. Los resultados de dicha simulación se obtuvieron de González-López (2015) y se identificaron los lugares en donde la máxima marejada ciclónica penetró tierra adentro a lo largo de la costa cerca del área de interés. Estos puntos, esparcidos a lo largo de la costa, fueron localizados en el espacio del modelo hidrológico y se les suministró la elevación de la superficie del agua durante el paso del Huracán. Cada vértice de la malla en la zona limítrofe entre la tierra y el mar contiene los valores de elevación del agua debido a la marejada ciclónica. La malla computacional usada en el modelo hidrológico tiene una resolución espacial de 30 m. La precipitación espacial del radar se corrió sobre las cuencas en forma coordinada con la

variación de las elevaciones de marejada ciclónica para simular dinámicamente ambos efectos. Los flujos generados por los niveles de agua salada provenientes de la marejada ciclónica discurren por el terreno y, dependiendo de la topografía, se mueven hacia el cauce del río o hacia la costa. El modelo hidrológico superpone estos caudales de agua salada con los de agua fresca. La Figura 15 muestra la localización de la malla computacional de la marejada ciclónica sobre el área de interés que se va a utilizar en el modelo hidrológico. Estos valores varían en espacio y tiempo durante la simulación con el modelo hidrológico.

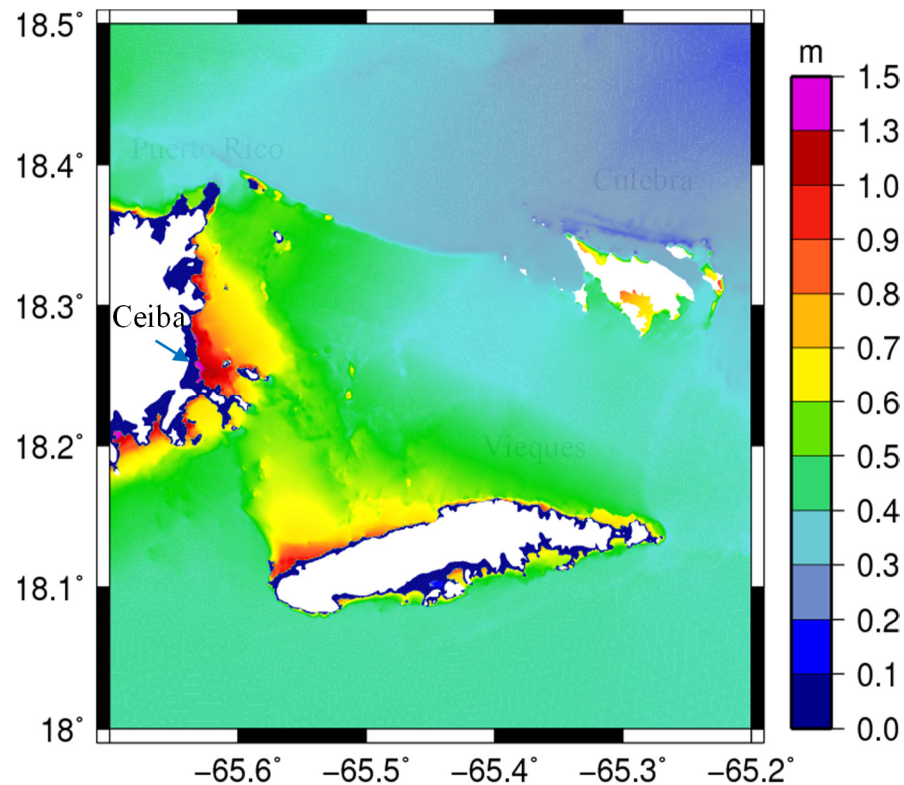


Figura 14: Elevación máxima de la superficie de agua durante el huracán Georges en Puerto Rico y sus islas Vieques y Culebra dado por el modelo de circulación ADCIRC+SWAN. Se puede observar que los máximos niveles se registraron en el municipio de Ceiba, PR (color magenta) (González-López, 2015).

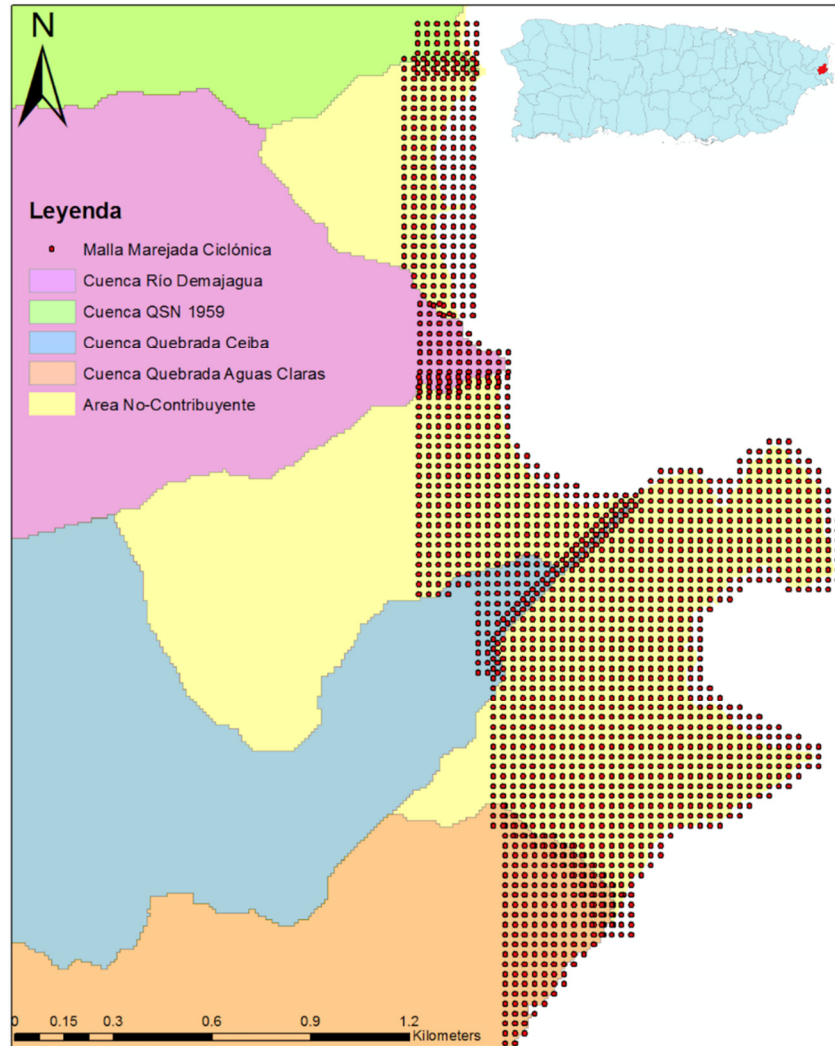


Figura 15: Localización de la malla computacional de la marejada ciclónica sobre el área de interés que se va a utilizar en el modelo hidrológico.

RECONOCIMIENTO DE CAMPO

Se realizó un reconocimiento de campo por las zonas bajas de las cuencas. Durante el transcurso de este viaje se observaron los ríos y quebradas más relevantes para este estudio. También se realizaron levantamientos topográficos de secciones transversales en diferentes ríos. Las secciones transversales medidas se compararon con las extraídas del LIDAR. En la mayoría de los casos la comparación fue muy buena para los efectos del rastreo hidrológico. La Figura 16 muestra la comparación de una sección medida y extraída de LIDAR para la quebrada Ceiba. La Figura 17 muestra una foto del lugar donde se midió la sección transversal. La Tabla 4 resume la comparación entre las secciones medidas en el campo y las obtenidas de LIDAR, en donde la columna de diferencia en porciento se refiere a la división entre la resta de ambas dimensiones y el promedio de ambas dimensiones.

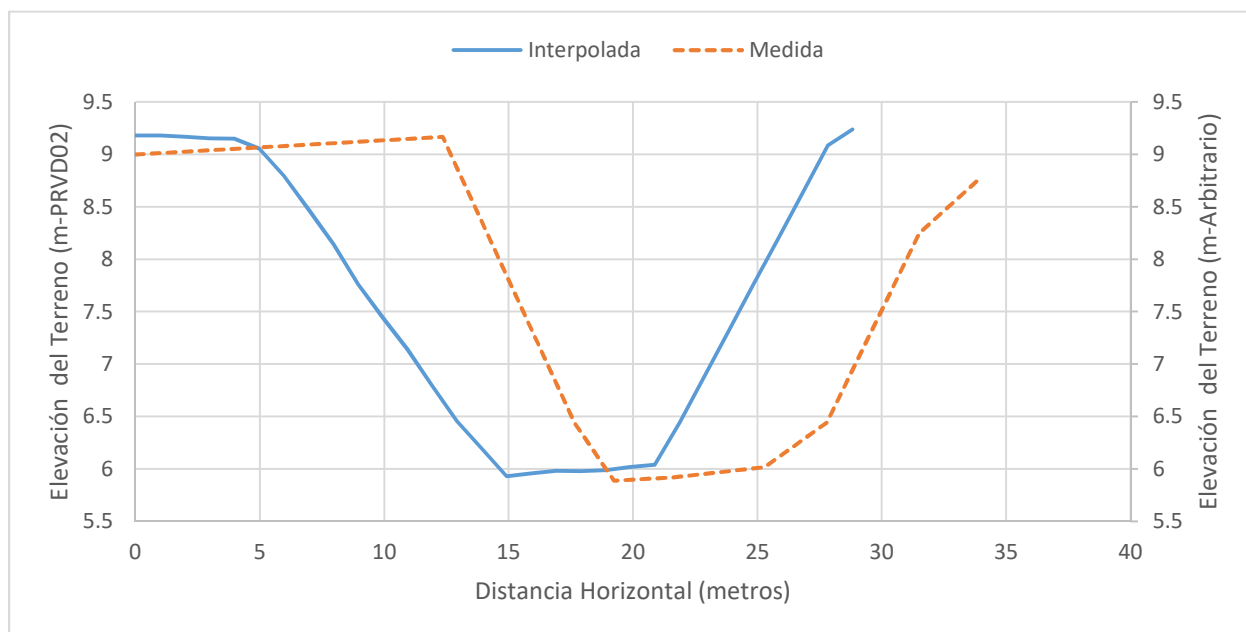


Figura 16: Comparación de sección transversal de la Quebrada Ceiba medida durante la visita de campo (línea entre cortada) y la sección transversal interpolada de LIDAR (línea sólida). La sección transversal medida es referenciada a un nivel de referencia arbitrario y la interpolada es referenciada al “Puerto Rico Vertical Datum of 2002” (por sus siglas PRVD02) (USACE, 2007).

Los cuerpos de agua regularmente poseen flujos y niveles de agua bajos, por lo tanto, el LIDAR de 1 m de resolución es capaz de obtener un buen mapeo de las secciones transversales de los ríos para este caso. Los datos de LIDAR comparan muy bien con los datos de campo para el propósito de computar el rastreo hidrológico a lo largo de las quebradas y ríos. Esta comparación provee cierta confiabilidad en el uso de LIDAR para estimar secciones transversales de quebradas y ríos en sitios inaccesibles, siempre y cuando los datos se hayan levantado cuando los niveles de agua estuviesen bajos y el LIDAR sea de buena resolución.



Figura 17: Ubicación de la sección transversal para la quebrada Ceiba (mirando aguas abajo).

Tabla 4: Diferencia entre las secciones transversales obtenidas en el campo y del LIDAR.

Dimensión Río/Quebrada	Ancho del Fondo		Espejo del Agua		Profundidad del Agua	
	Diferencia (cm)	Diferencia (%)	Diferencia (cm)	Diferencia (%)	Diferencia (cm)	Diferencia (%)
QSN 1959	155	41.8	21	1.4	12	5.2
Demajagua	6	1.2	89	4.2	64	33.3
Ceiba	9	1.5	139	6.3	16	5.0
Aguas Claras	247	77.8	13	0.8	56	31.5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para facilitar el entendimiento de los resultados se denomina “*escenario combinado*” aquel en que se simula la inundación tomando en consideración la marejada ciclónica que varía en tiempo y espacio a medida que la marea del huracán se mueve tierra adentro. En este escenario se utilizaron las series de tiempo de las elevaciones de agua producidas por la marejada ciclónica como datos de entrada para cada vértice de la malla en el modelo hidrológico. Además, se sincronizó el tiempo del evento de lluvia distribuida medida por el radar con las series de tiempo de la marejada ciclónica. Este escenario de inundación representa una situación dinámica en donde la marejada ciclónica penetra tierra adentro a la misma vez que el hidrograma de la escorrentía de la cuenca es producido. Por otra parte, el “*escenario sencillo*” se define como el escenario de inundación en donde el modelo hidrológico toma en consideración la marejada ciclónica solamente en la salida del río. Es decir, este escenario de inundación solo depende de la escorrentía superficial producida por la lluvia del evento y el flujo en el cauce es limitado en su salida debido a la marejada ciclónica. Es importante resaltar que ambos escenarios, sencillo y combinado, tienen la misma condición de frontera en la salida del río hacia la costa, la cual es una serie de tiempo de niveles de la superficie de

agua debido a la marejada ciclónica. La diferencia entre ambos es que el escenario combinado contiene la malla computacional de la marejada ciclónica que se presenta en la Figura 14 y representa la penetración de la marejada ciclónica tierra adentro en tiempo y espacio. Los resultados se presentan visualmente utilizando mapas de inundación disponibles a través de “Google Earth”. Los resultados presentados en este artículo se enfocan solamente en la cuenca del Río Demajagua, dado que fue la cuenca en donde hubo más interacción entre la marejada ciclónica y la escorrentía producida por la lluvia. Sin embargo, los resultados para las demás cuencas se mencionarán brevemente para completar la discusión. Los resultados que se presentan incluyen ambos escenarios y son los siguientes:

- 1) Mapas de niveles de inundación máximo.
- 2) Hidrogramas en distintas localizaciones del cauce cerca de la costa.
- 3) Volumen acumulado para determinar el impacto del agua de la marejada ciclónica y de la escorrentía producida por lluvia en la inundación total.
- 4) Análisis de sensibilidad.

Mapas de niveles de inundación máxima

Los riesgos de las inundaciones dependen altamente de la altura máxima del agua alcanzada durante el evento ciclónico. Además de los fuertes vientos, los ciclones tropicales son acompañados por sistemas de fuertes lluvias y tormentas eléctricas. En algunos casos, la causa mayor de las tragedias humanas es debida a las fuertes lluvias e inundaciones. Dependiendo de las características de la cuenca y de la distribución de la lluvia en espacio y tiempo, el nivel de inundación máxima en áreas costeras puede ser producido por una combinación de la inundación debida a la marejada ciclónica y debido a la lluvia. Para el Río Demajagua, el nivel máximo de inundación debido al escenario combinado alcanzó en la costa de 2.25 a 2.50 m. Estos niveles de inundación afectaron desarrollos urbanos donde el agua alcanzó cerca de 1.5 m de profundidad. Por otra parte, para el escenario de inundación sencilla se obtuvo un nivel máximo de inundación entre 1.50 a 1.75 m cerca de la costa. Por lo tanto, al incluir la penetración de la marejada ciclónica tierra adentro en el modelo hidrológico los niveles máximos de inundación pueden aumentar hasta 43% en comparación con la inundación sin considerar la penetración de la marejada ciclónica tierra adentro. La Figura 18 muestra los niveles máximos de inundación para el escenario sencillo y combinado de inundación. Además, el escenario de inundación combinado aumentó significativamente el valle de inundación del cauce cerca de la costa. No se hizo ningún mapa ni se recogió información sobre los niveles de inundación alcanzados por el huracán Georges dentro del área de este estudio. Por ende, no se pudo comparar niveles de inundación medidos con los simulados.

Análisis de hidrogramas

Los hidrogramas de flujo representan la respuesta de una cuenca a la escorrentía durante un evento de tormenta. El propósito de esta sección es analizar los hidrogramas obtenidos en diferentes localizaciones del Río Demajagua para ambos escenarios de inundación, sencillo y combinado. Los hidrogramas se obtuvieron a 0 m, 50 m y 100 m de la desembocadura del río. La simulación dinámica permite flujos en dirección aguas arriba y aguas abajo del río. Las condiciones de marejada ciclónica pudieran producir flujo aguas arriba en el río, lo cual ocurre ciertamente en los estuarios. En aquellos casos donde la dirección del flujo es río arriba el caudal calculado tendrá un valor negativo.

En general el flujo pico de la escorrentía por lluvia no coincide con el flujo pico debido a las condiciones de marejada ciclónica cerca de la desembocadura del río. Lo más probable es que ocurran dos caudales máximos, uno cuando la escorrentía de agua fresca de la cuenca es máxima y otro cuando el agua de la inundación de la marejada ciclónica se mezcla con el agua fresca, aumentando su caudal por el efecto combinado del agua salada del océano con el agua fresca del río. Si la marejada penetra antes que se produzca la escorrentía por el terreno, el pico de la

marejada ocurrirá antes que el pico de la escorrentía superficial. Para determinar con mayor precisión ambos caudales máximos se tiene que considerar la penetración de la marejada ciclónica dentro del modelo hidrológico.

Las Figuras 19A, 19B y 19C muestran los hidrogramas a 0 m, 50 m y 100 m de la desembocadura del Río Demajagua para ambos escenarios de inundación. No se observa atenuación del hidrograma a lo largo del río, ya que las distancias entre los lugares donde se obtuvieron son cortas. El primer pico ocurrió el 21 de septiembre de 1998 cerca de las 20:00 UTC y el segundo ocurrió el 22 de septiembre de 1998 cerca de las 1:35 UTC. Este comportamiento se repite en los tres hidrogramas para el *escenario combinado*. El primer pico es debido a la llegada de la marejada ciclónica solamente y tiene una magnitud de 38 m³/s para el escenario combinado y 20 m³/s para el *escenario sencillo* en la salida del cauce. Posteriormente, el agua fresca de la escorrentía superficial que llega de la cuenca debido a la lluvia se superpone con el agua salada de la marejada ciclónica mientras ambas se mueven hacia el océano produciendo un segundo pico en el hidrograma. Las magnitudes del caudal del segundo pico fueron de 39 m³/s en ambos escenarios para la desembocadura, 50 m y 100 m de la desembocadura. Ambos caudales máximos están desfasados por aproximadamente 5 horas. En las Figuras 19B y 19C se observa para el escenario combinado un primer pico de flujo mucho mayor que para el escenario sencillo. Esto se debe a la contribución que hace la penetración de la marejada ciclónica tierra adentro. Esto aumenta el volumen de agua en los valles de inundación del cauce y las aguas discurren hacia el cauce. El resultado es un incremento en el caudal hacia la costa. Condiciones similares ocurrieron para las demás cuencas dentro del área de interés.

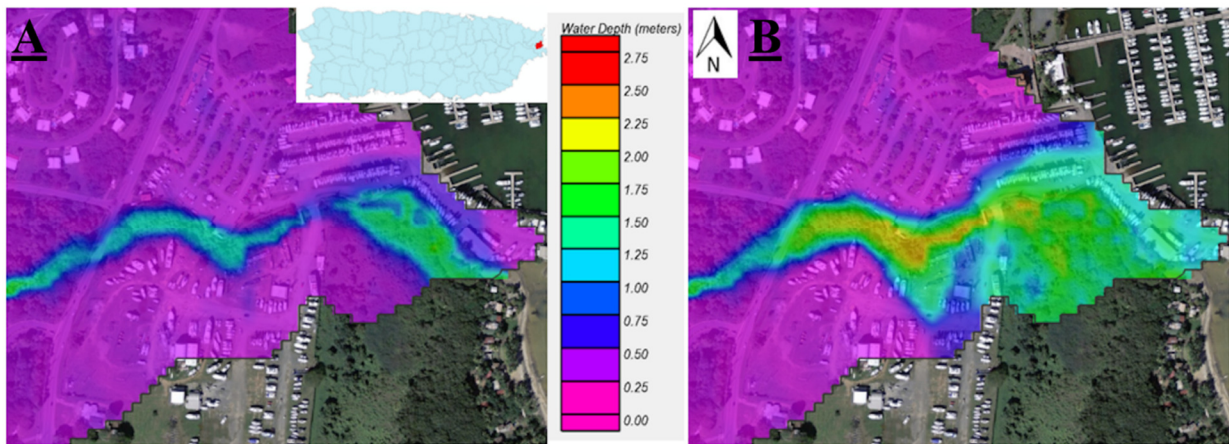


Figura 18: Nivel de inundación máxima para el escenario de inundación sencilla (A) y el escenario de inundación combinado (B) para la salida del río Demajagua. Los valores de la escala representan una profundidad de agua en metros (“Water Depth”).

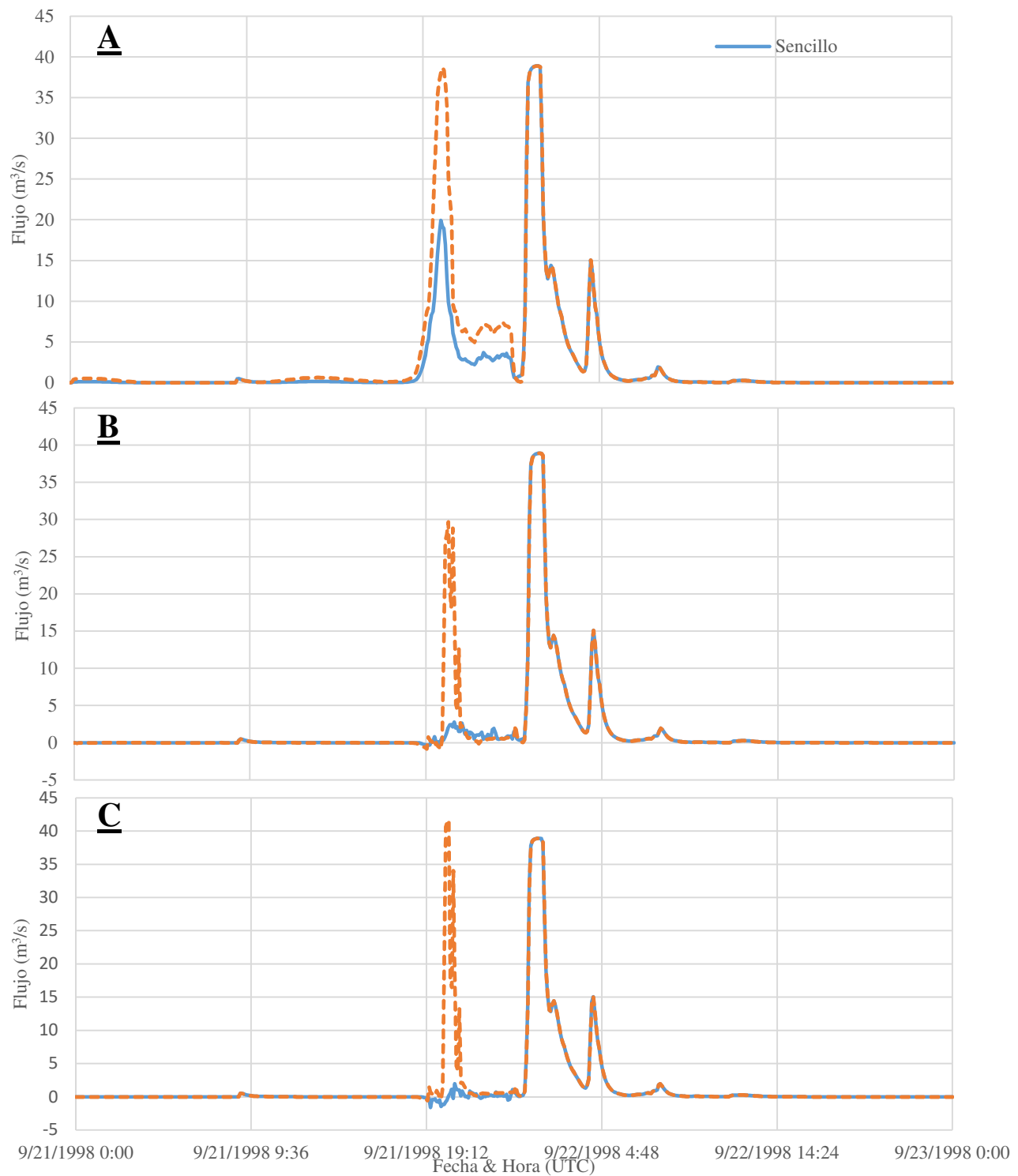


Figura 19: Hidrogramas para el escenario sencillo y combinado de inundación para la cuenca del Río Demajagua. A) En la desembocadura del río. B) A 50-metros de la desembocadura del río. C) A 100-metros de la desembocadura del río. El escenario sencillo se representa con una línea sólida y el escenario combinado se representa con una línea entre cortada.

Análisis de volumen acumulado

A pesar de que los caudales picos son utilizados para resaltar condiciones de peligro y las regulaciones promueven el cero incremento de caudales picos, los volúmenes de agua juegan un papel importante en los niveles de agua durante condiciones de inundación. Esto es más importante durante condiciones de marejada ciclónica, porque el agua del océano penetra tierra adentro lo que aumenta los volúmenes de agua y los niveles de inundación.

Para cuantificar el volumen de agua contribuido por la marejada ciclónica se calculó el volumen acumulado para el escenario sencillo y el combinado. El volumen se puede calcular como el área debajo la curva del hidrograma. Luego se compararon ambos escenarios y los resultados para las tres localizaciones del Río Demajagua se resumen en la Tabla 5. La contribución de la marejada ciclónica en el volumen es la diferencia entre el volumen del escenario combinado menos el volumen del escenario sencillo. Los resultados demuestran que la penetración de la marejada ciclónica aumenta los volúmenes de agua tierra adentro tan lejos como 100 m aguas arriba de la desembocadura del río. Esta tabla muestra que la contribución en el volumen de agua debido a la marejada ciclónica es 28%, 17.4% y 24.2% del volumen total en la desembocadura, a 0 m, 50 m y 100 m de la desembocadura del río respectivamente. Los efectos de la marejada ciclónica ocurrieron aproximadamente el 21 de septiembre de 1998 a las 20:00 (UTC). En general, la contribución de la marejada ciclónica disminuye al desplazarse río arriba.

Tabla 5: Volumen de aguas acumulado en distintas localizaciones del Río Demajagua para distintos escenarios de inundación.

Volumen Acumulado	Distancia desde la desembocadura		
	0-metros	50-metros	100-metros
Escenario de Inundación Sencillo (m ³)	339,947	252,611	242,066
Escenario de Inundación Combinado (m ³)	471,967	305,917	319,321
Contribución Marejada Ciclónica (m ³)	132,020	53,306	77,255
Contribución Marejada Ciclónica (%)	28.0	17.4	24.2

Análisis de sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad del modelo hidrológico para la cuenca del Río Demajagua con el propósito de determinar cómo la incertidumbre en los parámetros del modelo afecta los caudales. El análisis consiste en aumentar y disminuir los parámetros del modelo hidrológico y observar su influencia en los hidrogramas producidos. Los hidrogramas se compararon a 50 m y 100 m de distancia de la salida del cauce en la costa y el escenario de inundación que se escogió para el análisis fue el escenario combinado. La humedad inicial del suelo, el coeficiente de rugosidad del terreno y el coeficiente de rugosidad del cauce se aumentaron y disminuyeron en 25% de su valor estimado. La conductividad hidráulica solo se disminuyó un 5% de su valor original ya que disminuciones mayores causan inestabilidad numérica. La Tabla 6 resume los resultados.

El parámetro que más afecta el volumen es la conductividad hidráulica con una disminución del volumen en un 59% y un aumento del 11% del volumen en promedio. Durante el paso de tormentas tropicales los suelos están saturados y por lo tanto la conductividad hidráulica es baja. En caso de que la conductividad sea menor que el valor utilizado, la incertidumbre del resultado se afecta en menor grado que si el valor fuese subestimado. El segundo parámetro más sensitivo es el coeficiente de rugosidad del cauce con una disminución del volumen en un 12% y un aumento del 8% del volumen en promedio. El parámetro menos sensitivo es la humedad inicial del suelo con una disminución del volumen en un 6% y un aumento del 1% del volumen en promedio. Si aumentamos los coeficientes de rugosidad superficial el flujo va a disminuir, por lo tanto, el flujo es inversamente proporcional a el coeficiente de

rugosidad del cauce. Por el contrario, el flujo es directamente proporcional a la humedad inicial del suelo, ya que si se aumenta la conductividad hidráulica aumenta el flujo. En un estudio previo GSSHA demostró ser sensitivo a la conductividad hidráulica (Ogden, 2016).

Tabla 6: Resultados del análisis de sensibilidad para el Río Demajagua en términos del volumen total.

		A 50 m desde la salida		A 100 m desde la salida	
		Volumen (m ³)	Diferencia (%)	Volumen (m ³)	Diferencia (%)
	Volumen Original	305,917	-----	319,321	-----
Conductividad Hidráulica	25% A	176,945	-53.4%	164,818	-63.8%
	5% D	342,278*	11.2%	356,545	11.0%
Humedad Inicial	25% A	321,007	4.8%	311,571	-2.5%
	25% D	288,769	-5.8%	302,306	-5.5%
Rugosidad Terreno	25% A	285,776	-6.8%	285,826	-11.1%
	25% D	316,807	3.5%	318,171	-0.4%
Rugosidad Cauce	25% A	294,131	-3.9%	259,937	-20.5%
	25% D	330,613	7.8%	344,214	7.5%

A = Aumento; D = Disminución; *La conductividad hidráulica fue disminuida por un 5% de su valor original.

CONCLUSIONES

Los efectos producidos por eventos ciclónicos, como huracanes y tormentas tropicales, están asociados con altas precipitaciones. Las inundaciones costeras son el producto de los efectos de penetración de la marejada ciclónica producida por los fuertes vientos asociados con los eventos ciclónicos y la escorrentía excesiva que se produce tierra adentro. El estudio de la dinámica de ambos efectos requiere la combinación de esfuerzos por parte de ingenieros en hidrología e ingenieros de costas. El estudio requiere el acoplamiento de modelos de circulación oceánica con modelos hidrológicos espacialmente distribuidos. Los niveles de marea obtenidos por el modelo de circulación constituyen los datos de entrada para el modelo hidrológico. A este último debe agregarse la distribución y variación temporal de la lluvia medida por radares y las características de topografía, tipos de suelo y uso de terreno que forma la entrada de datos para el modelo hidrológico. Esta metodología fue aplicada usando los datos del huracán Georges durante su entrada a Puerto Rico.

Los resultados muestran que los efectos combinados de la penetración de la marejada ciclónica y de la escorrentía producida por fuertes lluvias depositadas por el huracán Georges aumentaron los niveles de inundación en la zona costera del Este de Puerto Rico. El estudio revela que los tiempos de respuesta de la cuenca pueden producir diferentes escenarios. En general, el caudal máximo de la escorrentía por lluvia no coincide con el flujo pico debido a las condiciones de marejada ciclónica cerca de la desembocadura del río. En cuencas pequeñas y con pendientes empinadas, típicas de las islas tropicales, lo más probable es que ocurran dos caudales máximos, uno cuando la escorrentía de agua fresca de la cuenca es máxima y otro cuando el agua salada de la marejada ciclónica se mezcla con la escorrentía de lluvia. El orden en que ocurran depende de la variabilidad temporal y espacial de la lluvia y el campo de vientos y olas de la tormenta. La morfología del río y las características del cauce y valles inundables cerca de la costa influyen también. Por ejemplo, en una de las cuencas estudiadas se observó que los manglares costeros forman una barrera protectora que disipa la energía de las ondas y reduce los efectos de la marejada. Esto resalta la importancia de la existencia de áreas de mitigación en las zonas costeras.

La contribución del volumen debido a la penetración de la marejada ciclónica incrementa los volúmenes de agua en las zonas costeras y al combinarse con el volumen de agua fresca produce aumentos en los niveles de inundación. El estudio resalta la importancia de considerar la contribución del volumen de agua salada al volumen total de la inundación, especialmente en cuencas pequeñas o en eventos que depositan poca precipitación.

Al presente, los mapas de inundación costera se desarrollan usando modelos de circulación sin tomar en cuenta la hidrología tierra adentro para estimar los niveles de inundación. Este estudio demuestra que, para obtener magnitudes de niveles de inundación costeros debe acoplarse la interacción dinámica de la penetración de la marejada tierra adentro producida por los vientos y olas con las inundaciones por precipitación. Los resultados del huracán Georges demostraron que sin considerar el efecto combinado los niveles de inundación producidos por mareas y modelos impulsados por la circulación del viento tienden a subestimar las condiciones de peligro real. Esta consideración es particularmente importante en islas tropicales con cuencas pequeñas y pendientes empinadas. Actualmente los autores trabajan en probar la metodología propuesta en cuencas donde se pueda lograr un modelo calibrado que permita su uso para otros eventos similares.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el auspicio del Sistema de Observación Oceánica y Costera del Caribe (CariCOOS por sus siglas en inglés) y del Instituto de Investigaciones sobre Recursos de Agua y el Ambiente de Puerto Rico.

REFERENCIAS

- Bedient, P. B., Huber, W. C., y Vieux, B. (2008). "Radar Rainfall Applications in Hydrology" in *Hydrology and Floodplain Analysis*, 4th edition, Pearson Education, New Jersey, Chapter 11, pp 658-708.
- Bennett, S., y Mojica, R. (2009). "Hurricane Georges Preliminary Storm Report: From the Tropical Atlantic to the United States Virgin Islands and Puerto Rico", National Oceanic and Atmosphere Administration, National Weather Service, Weather Forecast Office, San Juan, PR, obtenido de: http://www.srh.noaa.gov/sju/?n=1998_georges.
- Bunya, S., Dietrich, J. C., Westerink, J. J., Ebersole, B. A., Smith, J. M., Atkinson, J. H., y Jensen, R. (2010). "A high-resolution coupled riverine flow, tide, wind, wind wave, and storm surge model for Southern Louisiana and Mississippi. Part I: model development and validation", *Monthly Weather Review*, Vol. 138, no. 2, pp. 345–77.
- Centro de Recaudación de Ingresos Municipales de Puerto Rico (2006). "Revision of Hydrographic Layer of CRIM Basemap", Oficina de Gerencia y Presupuesto, San Juan, PR, obtenido de: http://gis.otg.pr.gov/Downloads/Hydrography/Hidrografia_CRIM_OGP.zip (February, 5, 2016)
- Dietrich, J.C., Zijlema, M., Westerink, J.J., Holthuijsen, L.H., Dawson, C., Luettich, R.A., Jensen, R.E., Smith, J.M., Stelling, G.S., y Stone, G.W. (2011). "Modeling hurricane waves and storm surge using integrally-coupled, scalable computations", *Coastal Engineering*, Vol. 58, No. 1, pp. 45–65.
- Downer, C. W. y Ogden, F. L. (2006). "Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis (GSSHA) User's Manual," ERDC/CHL SR-06-1, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.
- El Nuevo Día (2013). "Los cinco huracanes más intensos en Puerto Rico", GFR Media, Guaynabo, PR, recuperado de: <http://www.elnuevodia.com/noticias/locales/nota/loscincohuracanesmasintensosenpuertorico-1547186/>.
- Federal Emergency Management Agency (2009). "Flood Insurance Study for Puerto Rico," Commonwealth of Puerto Rico and Municipalities, Jacksonville, Florida.
- Funakoshi, Y., Hagen, S. C., y Bacopoulos, P. (2008). "Coupling of hydrodynamic and wave models: case study for hurricane Floyd (1999) hindcast", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 134, Issue 6, pp. 321-335.
- González-López, J., Westerink, J. J., Canals, M., y Morell, J. M. (2015). "Coupled global wind and tide driven coastal water levels and currents in Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands", OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington, Washington, DC, pp. 1-6.
- González-López, J. (2015). "Regional and Coastal Hydrodynamics of Puerto Rico, the U.S. Virgin Islands, and the Caribbean Sea", Ph.D. Dissertation, University of Notre Dame, Notre Dame, Indiana.

- Giri, C., Ochieng, E., Tieszen, L. L., Zhu, Z., Singh, A., Loveland, T., Masek, J., y Duke, N. (2011). "Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data", *Global Ecology and Biogeography*, Vol. 20, No. 1, pp. 154-159.
- Guiney, J. L. (1999). "Preliminary Report: Hurricane Georges", National Oceanic and Atmosphere Administration, National Hurricane Center, Miami, FL.
- Halgren, J. (2012). "TRES-SMA: a multi-event Hybrid Hydrologic Model Applied at California Gulch, Colorado", Ph.D. dissertation, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Hope, M. E., Westerink, J. J., Kennedy, A. B., Kerr, P. C., Dietrich, J. C., Dawson, C., y Bender C. J. (2013). "Hindcast and validation of Hurricane Ike (2008) waves, forerunner, and storm surge", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 118, No. 9, pp. 4424-60.
- Intersection of Severe Weather, Climate and Society (2010). "Historical Hurricane Tracks", University of Illinois Urbana- Champaign, Champaign, IL, obtenido de:
<<http://www.atmos.uiuc.edu/iswecs/Google.Earth/Tropical/Hurtracks/Hurtracks.kmz>>
- Junta de Planificación de Puerto Rico (2006). "Cubierta de Suelos, 2006." Departamento de Estado de Puerto Rico, San Juan, PR. Recuperado de: <http://www2.pr.gov/agencias/gis/descargaGeodatos/ambientales/Pages/Usos-y-cubierta-de-suelos.aspx>.
- Kalyanapu, A.J., Burian, S.J., y McPherson, T.N. (2009). "Effect of land use-based surface roughness on hydrologic model output", *Journal of Spatial Hydrology*, Vol. 9, No. 2, pp. 51-71.
- Kendall, M., Monaco, M., Buja, K., Christensen, J., Kruer, C., Finkbeiner, M., y Warner, R. (2001). "Methods Used to Map the Benthic Habitats of Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands", Benthic Habitats of Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands, U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Ocean Service (NOS), National Centers for Coastal Ocean Science (NOS) Biogeography Program, Silver Spring, Maryland.
- Luettich, R. A., Westerink, J. J., y Scheffner, N. W. (1992). "ADCIRC: An Advanced Three-Dimensional Circulation Model for Shelves, Coasts, and Estuaries. I: Theory and Methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL." Technical Report DRP-92-6, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.
- National Center for Environmental Information (2016a). "Climate Data Online: Fajardo Station", National Oceanic and Atmosphere Administration, U.S. Department of Commerce, Asheville, NC, obtenido de:
<https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web> (February 15, 2016).
- National Center for Environmental Information (2016b). "NEXRAD Inventory: TJUA- San Juan PR", National Oceanic and Atmosphere Administration, U.S. Department of Commerce, Asheville, NC, obtenido de:
<http://www.ncdc.noaa.gov/nexradinv/chooseday.jsp?id=TJUA&Submit=Submits> (February 16, 2016).
- National Hurricane Center (2009). "Glossary of NHC Terms", National Oceanic and Atmosphere Administration, Miami, FL, obtenido de: <http://www.nhc.noaa.gov/aboutgloss.shtml>.
- National Oceanic and Atmosphere Administration (2016). "San Juan, La Puntilla, San Juan Bay, PR - Station ID: 9755371: Tides and Currents", Center for Operational Oceanographic Products and Services, obtenido de: <https://tidesandcurrents.noaa.gov/stationhome.html?id=9755371> (March 10, 2016).
- National Ocean Service (2015). "Ocean Facts: What is LIDAR?", National Oceanic and Atmosphere Administration, Silver Spring, MD, obtenido de: <http://oceanservice.noaa.gov/facts/lidar.html>.
- Natural Resources Conservation Service (2004). "Soil Survey Geographic (SSURGO) Database for Puerto Rico, All Regions", United States Department of Agriculture, obtenido de:
<http://www2.pr.gov/agencias/gis/descargaGeodatos/ambientales/Pages/Tipos-de-suelo.aspx>.
- Ogden, F. L. y Sagharian, B. (1997). "Green and Ampt infiltration with redistribution", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 123, No. 5, pp. 386-393.

- Ogden, F. L. (2016). "Evidence of equilibrium peak runoff rates in steep tropical terrain on the island of Dominica during Tropical Storm Erika, August 27, 2015", *Journal of Hydrology*, Vol. 542, pp. 35-46.
- Puerto Rico Weather Forecast Office (2012). "Tropical Storms and Hurricanes which Passed Within Two Degrees of Latitude of Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands from 1515 to Present", National Oceanic and Atmosphere Administration, National Weather Service, San Juan, PR, obtenido de : <http://www.srh.noaa.gov/sju/?n=tropical02>
- Ramírez, J. T. (2010). "Huracanes", Universidad Interamericana de Puerto Rico, Recinto de Ponce, Centro de Recursos Educativos para Matemáticas y Ciencias, Ponce, PR, recuperado de: <http://cremc.ponce.inter.edu/huracanes/forman.htm>
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., y Miller, N. (1983). "Green-Ampt infiltration parameters from soil data", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 109, No. 1, pp. 62-70.
- Roche, A. y Vasquez, M. (2000). "An evaluation of WSR-88D rainfall estimates across Puerto Rico during Hurricane Debbie", NEXRAD Weather Forecast Office San Juan, Carolina, PR.
- Taylor, L.A., Eakins, B.W., Carignan, K.S., Warnken, R.R., Sazonova, y Schoolcraft, T. (2008). "Digital Elevation Models of Puerto Rico: Procedures, Data Sources and Analysis", NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-13, National Geophysical Data Center, Boulder, CO, 27 pp.
- Torres-Sierra, H. (2002). "Flood of September 22, 1998, in Arecibo and Utuado, Puerto Rico," U.S. Geological Survey, Technical Report 01-4247, San Juan, Puerto Rico.
- U.S. Army Corps of Engineers, St. Louis District (2007). "2004 USACE Puerto Rico Lidar", NOAA's Ocean Service, Office for Coastal Management, Charleston, South Carolina.
- Westerink, J. J., Luettich, R. A., Feyen, J. C., Atkinson, J. H., Dawson, C., Roberts, H. J., Powell, M. D., Dunion, J. P., Kubatko, E. J., y Pourtaheri, H. (2008). "A basin- to channel-scale unstructured grid hurricane storm surge model applied to Southern Louisiana", *Monthly Weather Review*, Vol. 136, No. 3, pp. 833-64.